

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ.

УДК 621.793+533.6.011

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ ДВУХФАЗНОЙ СТРУИ

А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев,
А. Н. Папырин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Насущные требования практики вызывают необходимость создания и развития новых ресурсосберегающих наукоемких технологий. К таким технологиям, в частности, относится нанесение порошковых покрытий — защитных, упрочняющих, токопроводящих и т. д. Среди известных к настоящему времени методов напыления наиболее перспективными являются газотермические (газопламенные, плазменные, детонационные и др.), позволяющие формировать покрытия из различных материалов и обеспечивать широкий спектр физико-химических и потребительских свойств. Достоинства и недостатки этих методов широко известны [1–3]. Ограничение области их применения обусловлено в основном использованием высокотемпературных струй ($2000 \div 5 \cdot 10^4$ К).

В связи с этим важный научный и практический интерес представляет выявленный ранее эффект образования покрытий из частиц алюминия в твердом состоянии на лобовой поверхности тел, обтекаемых сверхзвуковым двухфазным потоком при температуре торможения $T_0 \sim 300$ К. Метод напыления, основанный на этом эффекте, был назван методом «холодного» газодинамического напыления [4]. Для широкого практического применения данного метода требовалась реализация его в режиме двухфазная струя — движущаяся преграда, для чего необходимо было предварительно провести цикл исследований плоской сверхзвуковой двухфазной струи, в частности характера натекания ее на преграду, измерение скорости частиц диаметром $d_{\text{ч}} \leq 50 \cdot 10^{-6}$ м в такой струе и т. д. Результаты этих исследований приведены в данной работе.

1. Описание установки и методов диагностики. Для эффективного разгона частиц в сверхзвуковой части сопла необходимо, чтобы ее длина была не менее длины релаксации частиц, используемых для напыления. Оценка длины релаксации l_p частиц диаметром $d_{\text{ч}} = 50 \cdot 10^{-6}$ м, ускоряемых в сверхзвуковом сопле с числом Маха $M = 2,0 \div 3,0$, при характерных значениях относительной скорости $\Delta v = v - v_{\text{ч}} \sim 100$ м/с и плотности $\rho_{\text{ч}} \simeq 5 \cdot 10^3$ кг/м³ частиц, плотности $\rho \simeq 3$ кг/м³ и вязкости $\mu \simeq 10^{-5}$ кг/(м·с) газа, числе Рейнольдса $Re = \Delta v d_{\text{ч}} \rho / \mu \sim 10^3$ дает $l_p = 4(e - 2)\rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}} / 3\rho \simeq 0,1$ м (коэффициент сопротивления частицы C_x при таких Re для оценки принят равным единице). При подлете к подложке частица тормозится в сжатом слое, формирующемся при натекании сверхзвуковой струи на преграду. Оценка показывает, что скорость частицы ($d_{\text{ч}} \simeq 5 \cdot 10^{-6}$ м и $\rho_{\text{ч}} \simeq 5 \cdot 10^3$ кг/м³) уменьшается в сжатом слое в e раз на толщине $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ м. С учетом этого эффекта, а также имея в виду, что толщина сжатого слоя в основном определяется меньшим поперечным размером струи, использовались плоские сопла, критическое сечение в которых задавалось высотой b^* и толщиной профилированных вставок $h = (1 \div 5) \cdot 10^{-3}$ м. Выходное сечение сопла Лавала $H \times h$ соответствовало $M = 2,0 \div 3,0$ без учета вытесняющего действия пограничного слоя.

Для проведения экспериментов по исследованию различных параметров истекающей из таких сопел плоской сверхзвуковой струи была спроектирована и изготовлена установка. На рис. 1 представлено ее схематическое изображение с методами диагностики. Основными элементами установки являются: сверхзвуковое плоское сопло 1, дозатор ча-

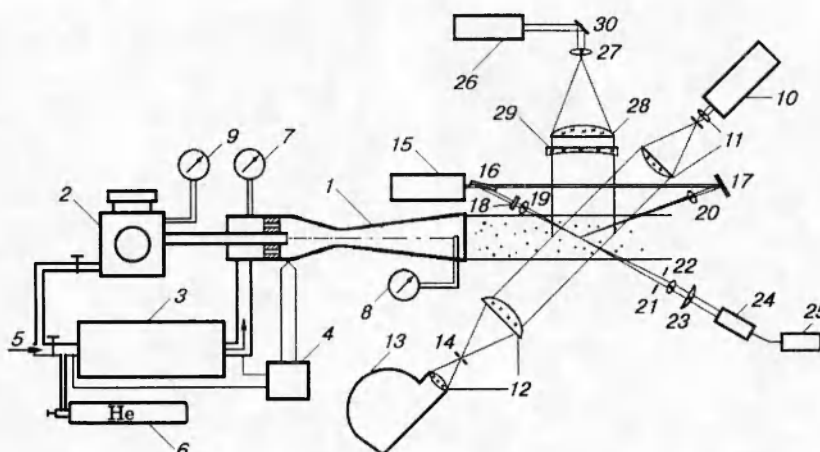


Рис. 1

стиц 2, подогреватель газа 3 с системой регулировки температуры подогрева 4. В качестве рабочего газа использовался воздух 5, а также сжатый газ — гелий, аргон из баллона 6, давление в форкамере, на срезе сопла и в дозаторе контролировалось образцовыми манометрами 7–9. Система питания установки позволяла получать газовую смесь определенного состава, в результате чего можно было регулировать скорость истечения газа на выходе из сопла в широких пределах от скорости чистого воздуха (560 м/с для $M = 2,6$) до скорости чистого гелия (1400 м/с для $M = 2,6$) в расчетном режиме истечения и, как показали дальнейшие исследования, в очень широких пределах изменять и скорость частиц. Методы диагностики включали в себя:

- методы быстродействующей лазерной визуализации;
- регистрацию траектории частиц методом лазерного «ножа»;
- лазер-доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) с прямым спектральным анализом;
- измерение скорости частиц в струе методом треков.

Установка позволяла также проводить измерения распределения скорости газа в струе с помощью трубки полного напора.

2. Визуализация струи. Свободная газовая струя и струя, натекающая на преграду, исследованы теоретически и экспериментально (см., например, [5]). Однако в условиях наших экспериментов возникает ряд особенностей, связанных с необычными геометрическими характеристиками сопел: большим удлинением и прямоугольной формой выходного сечения с малым значением одной из сторон, когда существенную роль может играть пограничный слой на стенках сопла. И в этом плане целесообразно было провести визуализацию структуры течения с целью выбора оптимального режима работы сопла и расположения подложки относительно его среза, а также определить положение центрального скачка перед преградой, что имеет важное значение для оценки эффекта торможения частиц в сжатом слое. Фоторегистрация струи проводилась методом быстродействующей лазерной визуализации, схематическое изображение которого представлено на рис. 1. В качестве источника света использовался рубиновый лазер 10, работающий в режиме модулированной добротности с длительностью импульса $\tau = 30 \cdot 10^{-9}$ с. Пучок света формировался телескопической системой 11, а изображение исследуемого объекта — приемной оптикой 12 и регистрировалось камерой 13. В фокусе приемной оптики устанавливался визуализирующий элемент 14, в качестве которого применялись металлический шарик, выполняющий роль симметричного ножа, либо визуализирующая диафрагма.

Исследовались расчетная струя гелия и струи воздуха при степенях нерасчетности $n = 0,6 \div 2,5$, истекающие из сопел с длиной разгонного участка $L = 0,07; 0,1; 0,13$ м и

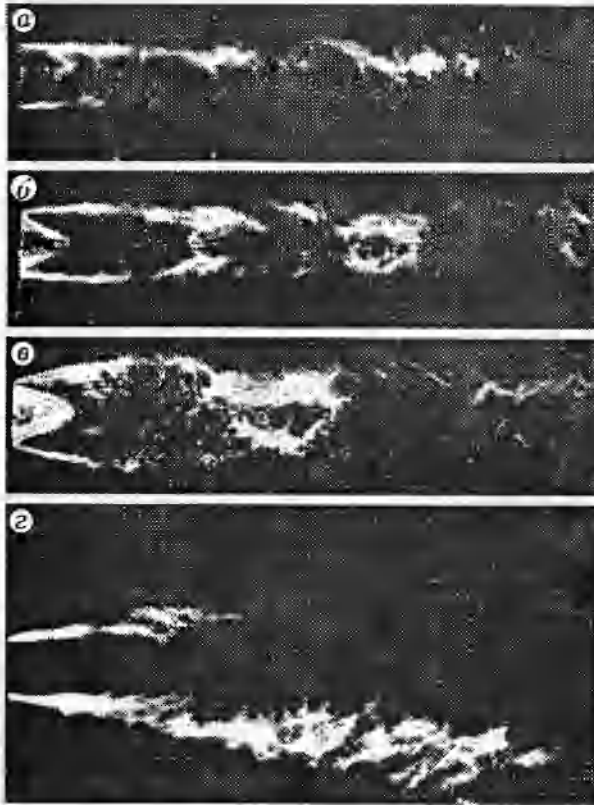


Рис. 2

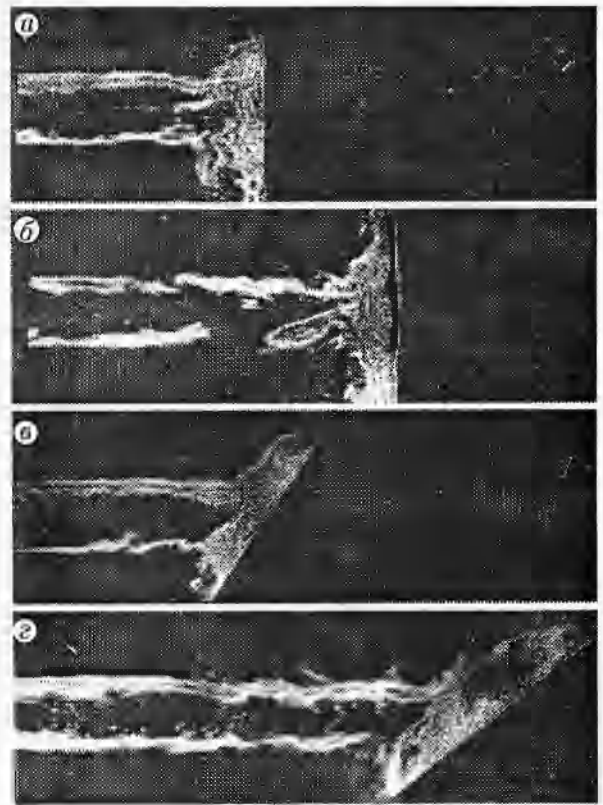


Рис. 3

$M = 2,35; 2,12; 2,01$ соответственно.

На рис. 2 представлены характерные мгновенные ($\tau = 30 \cdot 10^{-9}$ с) фотографии воздушной струи с $M = 2,01$, истекающей в свободное пространство при различных степенях нерасчетности ($a-v$ отвечают $n = 1; 1,5; 2$), и фотография струи гелия, истекающей в расчетном режиме (z). Анализ многочисленных фотографий показал, что струя воздуха, истекающая в расчетном режиме, остается неразрушенной до расстояния $6 \div 10$ калибров струи от среза сопла. Из полученных данных следует, что в ядре расчетной воздушной струи скорость газа, а следовательно, и скорость частиц несущественно меняются на расстояниях $0 \div 10$ калибров струи от среза сопла.

Как уже говорилось ранее, скорость взаимодействия частицы с подложкой определяется не только тем, какую скорость она приобретает, ускоряясь в сверхзвуковом сопле, но и тем, насколько она затормозится в сжатом слое между ударной волной и поверхностью подложки. Поэтому существенный интерес представляло исследование натекания плоской сверхзвуковой струи на преграду.

На рис. 3, $a, б$ представлены характерные шлирен-фотографии перпендикулярного натекания на преграду расчетной воздушной струи с $M = 2,35$. Расстояние от среза сопла до преграды варьировалось в пределах $0 \div 10$ калибров струи. Измерение по фотографиям толщины сжатого слоя показало, что она слабо зависит от расстояния от среза сопла до преграды при изменении последнего от 0 до ~ 10 калибров струи. Это хорошо видно из рис. 4, где по оси абсцисс отложено расстояние от среза сопла до преграды, отнесенное к меньшему размеру выходного сечения сопла h , а по оси ординат — отношение толщины сжатого слоя к h , которое варьировалось от $1 \cdot 10^{-3}$ м (точки 3) до $2,3 \cdot 10^{-3}$ м (4), $3 \cdot 10^{-3}$ м

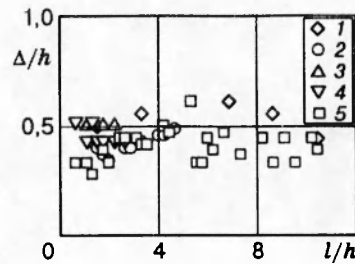


Рис. 4

(1, 5) и $5 \cdot 10^{-3}$ м (2). Видно, что Δ/h меняется в пределах $0,3 \div 0,6$ для различных сопел, имея среднее значение $\sim 0,4$.

Очевидно, что при сближении сопла и преграды на расстояние $l_{\min} = 0,4h$ центральный скачок войдет в сопло и режим истечения нарушится. Поэтому l_{\min} можно считать минимальной дистанцией напыления. Исследование характера взаимодействия расчетной воздушной струи с преградой под углами 60° ; 45° ; 30° при различных расстояниях от среза сопла до преграды показало, что характер взаимодействия расчетной воздушной струи с преградой под различными углами к ней также слабо зависит от расстояния от среза сопла до преграды. На рис. 3 представлены характерные фотографии натекания струи под углом 60° и 45° (в и г). Отметим, что при запылении струи частицами алюминия даже при достаточно больших расходах дисперсной фазы ($Q_1 = 40$ кг/(с·м²)), что соответствует объемной концентрации $\varphi \simeq 10^{-4}$, картина течения и, в частности, положение центрального скачка уплотнения менялись слабо. Это позволило в дальнейшем при изучении двухфазной струи с умеренной концентрацией дисперсной фазы ($\varphi \leq 10^{-4}$) использовать результаты исследования незапыленной струи.

3. Оценки толщины пограничного слоя. Как уже отмечалось, при использовании сопел с необычными геометрическими характеристиками (большим удлинением и прямоугольной формой выходного сечения с малым значением одной из сторон) существенную роль может играть пограничный слой, формируемый на боковых стенках сверхзвуковой части сопла.

Оценим толщину вытеснения пограничного слоя в выходном сечении сопла при $M = 3$, $T_0 = 300$ К и статическом давлении $p = 0,1$ МПа, считая, что он развивается на плоской пластине в безградиентном потоке и является полностью турбулентным. Для вышеуказанных параметров газового потока, характерной длины разгонного участка сопла $L = 0,1$ м и статической температуры $T_{ст} = T_0/(1 + 0,2M^2) = 110$ К имеем $Re = 2,5 \cdot 10^7$. Толщина потери импульса на плоской пластине в безградиентном потоке $\delta^{**} = LC_F/2$ ($C_F = \Psi_M C_{F0}$, C_{F0} — коэффициент среднего трения в несжимаемом потоке (по данным [6], $C_{F0} = 0,0027$), Ψ_M учитывает сжимаемость (согласно [7], $\Psi_M = 0,6$)). Следовательно, на плоской пластине при указанных выше условиях $\delta^{**}/L = 0,00081$, при $L = 0,1$ м $\delta^{**} = 81 \cdot 10^{-6}$ м. Форм-параметр $H = \delta^*/\delta^{**} = 5$ [7] для $M = 3$ при отсутствии теплообмена, что дает толщину вытеснения $\delta^* = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м, которая характеризует вытесняющее действие пограничного слоя. Эффективное сечение сопла при расчетах значения M необходимо уменьшить по контуру на эту величину. Конечно, проведенная оценка для плоской пластины позволяет судить только о порядке величины δ^* в выходном сечении сопла. Для оценки толщины пограничного слоя можно воспользоваться формулой $\delta \simeq 0,3L\sqrt{C_F}$ [8], откуда $\delta \simeq 1,2 \cdot 10^{-3}$ м $\simeq 0,4h$.

При более точном расчете необходимо учитывать градиент давления и эффект растекания. Полученные оценки завышены, поскольку градиент давления и эффект растекания в сверхзвуковом сопле снижают оцениваемые толщины. Тем не менее ясно, что погра-

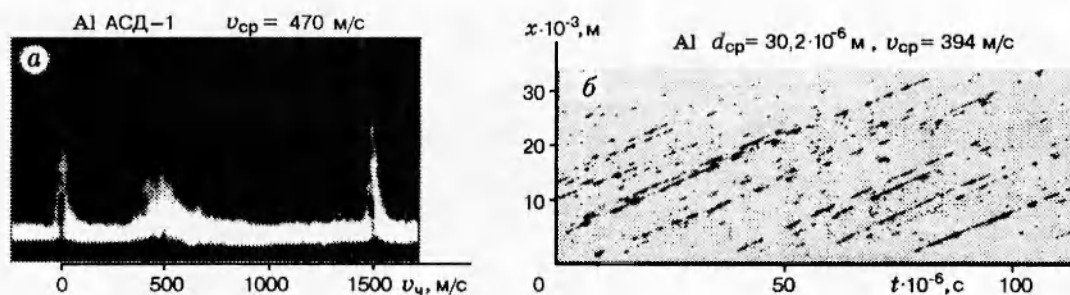


Рис. 5

ничный слой в сопле может повлиять на характеристики сверхзвуковой струи и быть препятствием к использованию сопел еще большей длины.

Фотографии струй, представленные на рис. 2 и 3, позволяют сделать качественные оценки толщины выходящего из сопла пограничного слоя. Засвеченные области струи характеризуются градиентами плотности в направлении, перпендикулярном направлению луча, и могут быть отождествлены с выходящими из сопла пограничными слоями, а центральная незасвеченная область — с ядром струи. Из анализа данных фотографий можно сделать вывод о том, что при расчетном истечении воздуха и гелия смыкания пограничных слоев еще не происходит, а толщину пограничного слоя грубо можно оценить как $\delta = (0,3 \div 0,4)h$.

Для более точной оценки толщины пограничного слоя были проведены экспериментальные измерения распределения скоростей на срезе сопла трубкой полного напора, имеющей внешний и внутренний диаметры приемной части $D = 0,35 \cdot 10^{-3}$ м и $d = 0,10 \cdot 10^{-3}$ м и перемещающейся с помощью микровинта. Положение приемной части в струе определялось по показаниям шкалы данного микровинта с точностью $10 \cdot 10^{-6}$ м. По данным измерениям толщина пограничного слоя составляла $\delta = (0,3 \div 0,4)h$, что совпадает с оценкой из оптических исследований (рис. 2, 3) и с приведенной выше.

Видно, что при характерных параметрах сопла ($L = 0,1$ м, $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $M = 2,0 \div 3,0$) смыкания пограничных слоев в сопле еще не происходит и режим истечения в ядре струи можно считать расчетным. Это позволяет в дальнейшем использовать численный расчет для оценки скорости частиц в ядре струи при напылении.

4. Измерение скорости частиц и сравнение с расчетом. Одной из наиболее важных задач было исследование влияния скорости частиц на процесс их взаимодействия с подложкой. Для этого, в свою очередь, необходимо прежде всего обеспечить возможность регулируемого изменения скорости частиц в широком диапазоне и отработать методику ее измерения на выходе из сопла.

Измерение скорости частиц осуществлялось ЛДИС с прямым спектральным методом регистрации доплеровского сдвига частоты (см. рис. 1), подробное описание и методические особенности его приведены в [9, 10]. Схема ЛДИС включала в себя: одночастотный гелий-неоновый лазер типа ЛГ-159 15, делительную прозрачную пластину 16, поворотное 100 %-е зеркало 17, поляризатор, служащий для регулировки интенсивности опорного луча 18, фокусирующие линзы 19, 20, апертурную диафрагму приемной оптической системы 21, собирающую линзу 22, согласующий объектив 23, многолучевой конфокальный интерферометр с фотоумножителем на выходе 24, осциллограф 25. Лазер-доплеровские измерители с прямым спектральным анализом наиболее эффективны при исследовании высокоскоростных потоков ($v_{\text{ч}} \geq 10^2$ м/с). На рис. 5,а приведена характерная осциллограмма, полученная при измерении скорости частиц алюминия АСД-1 методом ЛДИС.

Другим методом, используемым для измерения скорости частиц в струе на выходе из

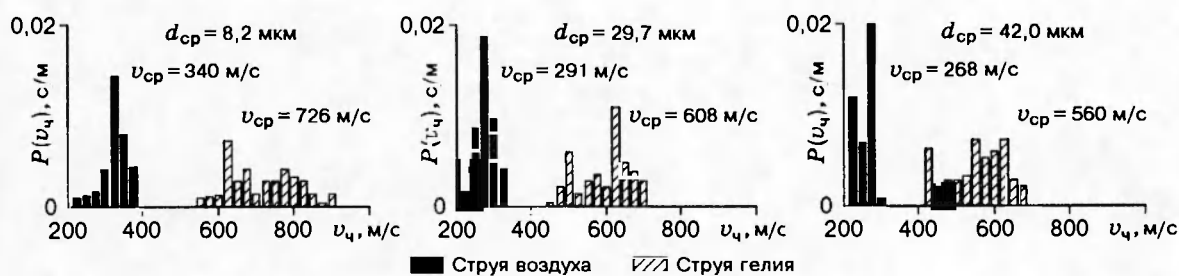


Рис. 6

сопла, был метод треков (см. рис. 1). Основными элементами схемы являются: рубиновый лазер 26, работающий в режиме свободной генерации, телескопическая система 27, 28, оптическая система, формирующая лазерный «нож» 29, поворотное 100 %-е зеркало 30, фоторегистратор 13, дающий непрерывную развертку по времени движущихся частиц. Изображение частиц из периферийных областей струи отсекалось экраном, вследствие чего измерялась скорость частиц, движущихся только в ядре струи. Используя неподвижный фоторегистратор, можно получить траектории частиц в струе, траектории падающих на поверхность частиц и отраженных от поверхности. Метод позволял надежно измерять скорость частиц $d_ч = (5 \div 50) \cdot 10^{-6}$ м в диапазоне $200 \div 1200$ м/с. Применение данного метода определения скоростей частиц было обусловлено его простотой, а также определенными достоинствами в сравнении с другими методами измерения скорости:

- позволяет проводить измерение при очень малых концентрациях частиц, когда заведомо исключается их влияние на параметры несущего газа;
- в результате обработки одной фоторазвертки можно получить данные о скорости частиц на различных расстояниях от среза сопла одновременно;
- довольно просто получить не только значение средней скорости частиц, но также и распределение их по скоростям, обусловленное распределением по размерам.

Анализ точности определения скорости частиц данным методом показывает, что относительная ошибка ее измерения $\Delta v_ч / v_ч = \Delta m / m + 2\Delta\alpha / \sin 2\alpha$ ($m, \Delta m$ — показание и точность шкалы измерителя скорости развертки фоторегистратора, $\Delta\alpha$ — точность определения угла наклона траектории на пленке) обусловлена точностью измерительного прибора и разбросом по углам частиц в струе. Выбирая скорость вращения развертывающегося многогранника так, чтобы $\alpha = 45^\circ$, и применяя соответствующие приборы регистрации, вполне можно измерять скорость частиц таким методом с точностью не хуже 10 %.

Проводились эксперименты по определению скорости частиц, разгоняемых воздушной и гелиевой струей. Использовались рассеянные по фракциям частицы алюминия и меди, а также большое количество других порошков, применяемых при напылении. Необходимым условием применимости метода треков является отсутствие разброса движущихся в ядре струи частиц по углам. Для того чтобы убедиться в этом, было проведено фотографирование по схеме лазерного «ножа» потока вылетающих из сопла частиц. Использование в качестве источника света рубинового лазера в режиме свободной генерации позволило зарегистрировать треки данных частиц. Анализ полученных фотографий показал, что в ядре струи частицы движутся параллельно ее оси без разброса по углам.

На рис. 5, б в качестве примера приведена фоторазвертка движущихся частиц алюминия фракции $d_ч = (40 \div 50) \cdot 10^{-6}$ м. Обработка таких фоторазверток на микроскопе путем измерения угла наклона траектории движущейся частицы к оси пленки позволила определить скорость каждой отдельной частицы на различных расстояниях от среза сопла, которое менялось в пределах $0 \div 30 \cdot 10^{-3}$ м. Проведенные измерения показали, что

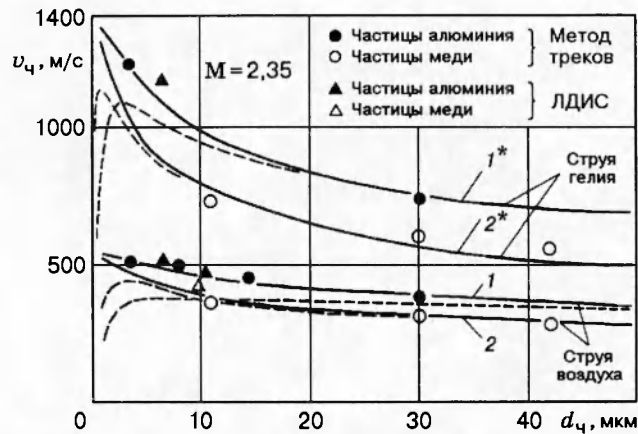


Рис. 7

скорость частиц практически не менялась в исследованной области ядра струи. На основе этих измерений были построены функции распределения частиц по скоростям, обусловленные их распределением по размерам. Средняя скорость частиц $v_{cp} = \Sigma v_i^4 / N$ и дисперсия распределения $\sigma_v = \Sigma (v_i^4 - v_{cp})^2 / (N - 1)$ находились обработкой результатов измерений (v_i^4 — скорость отдельной частицы).

Были измерены функции распределения по скоростям рассеянных фракций частиц алюминия и меди при ускорении их воздухом или гелием в расчетном режиме истечения в соплах с $L = 0,07; 0,1; 0,13$ м. Результаты, приведенные на рис. 6, наглядно иллюстрируют влияние на скорость частиц их размера и состава рабочего газа. Показаны функции распределения P по скоростям различных фракций меди, ускоряемых воздушной струей и струей гелия.

Результаты экспериментального определения скорости различных частиц на выходе из сопла сравнивались с результатами численного расчета и представлены на рис. 7 в виде графиков зависимости скорости частиц от их размера. Сплошные линии — результат численного расчета скорости частиц на выходе из сопла, разгоняемых воздушной струей (линии 1, 2) и струей гелия (линии 1*, 2*). Здесь же приведены результаты эксперимента по определению скорости этих частиц, полученные в условиях, принимаемых при расчете. Хорошее совпадение расчетных результатов с экспериментальными позволяет считать эти данные достоверными и в дальнейшем для оценки скорости частиц при напылении использовать расчет.

На рис. 7 представлены также результаты расчета скорости частиц алюминия и меди у поверхности подложки (штриховые линии). Легкие частицы заметно теряют свою скорость в заторможенной области газа непосредственно перед подложкой. Медные частицы более инерционны, имеют меньшую скорость на выходе из сопла, но зато меньше тормозятся за ударной волной. В итоге как медные, так и алюминиевые частицы, имеющие размеры $(5 \div 20) \cdot 10^{-6}$ м, сталкиваются с подложкой при разгоне в струе воздуха примерно с одинаковой скоростью (~ 400 м/с). В струе гелия влияние инерционности частиц сказывается на их конечной скорости еще более заметно. Данные результаты показывают, что для получения достаточно высокой скорости частиц на подложке необходимо не только выбрать сопло оптимальной длины, но также важно снизить неблагоприятное тормозящее действие сжатого газа непосредственно перед подложкой.

Таким образом, представленные результаты показывают эффективность использования для напыления сверхзвуковых плоских струй, обеспечивающих максимальную скорость удара частиц о подложку за счет снижения толщины сжатого слоя газа перед пре-

градой и, следовательно, минимального его тормозящего воздействия на частицы. Отработанная на основе экспериментальных данных методика регулирования и определения скорости частиц в пределах $200 \div 1200$ м/с позволила перейти к экспериментальным исследованиям основных закономерностей процесса формирования покрытий из частиц в твердом состоянии, различающихся материалом частиц, их скоростью, размером и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Ю. С., Харламов Ю. А., Сидоренко С. Л., Ардатовская Е. Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник. Киев: Наук. думка, 1987.
2. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.: Машиностроение, 1981.
3. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. Б. С. Митина. М.: Металлургия, 1987.
4. Патент РФ № 1618782. Способ получения алюминиевых покрытий / А. П. Алхимов, А. Н. Папырин. Открытия. Изобретения. 1991. № 1.
5. Сверхзвуковые газовые струи / Под ред. В. Г. Дулова. Новосибирск: Наука, 1983.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
7. Лапин Ю. В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. М.: Наука, 1983.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
9. Алхимов А. П., Папырин А. Н., Солоухин Р. И. и др. Лазерный доплеровский измеритель скорости для исследования газодинамических потоков // Физика горения и взрыва 1973. № 4. С. 585–596.
10. Алхимов А. П., Папырин А. Н., Предеин А. Л., Солоухин Р. И. Экспериментальное исследование эффекта скоростного отставания частиц в сверхзвуковом потоке газа // ПМТФ. 1977. № 4. С. 80–87.

Поступила в редакцию 29/XI 1995 г.
